



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

*Metodología de diseño de robots
asistenciales. Aplicación al robot portátil
ASIBOT.*

Autor:

ALBERTO JARDÓN HUETE

Directores:

Dr. ANTONIO GIMÉNEZ FERNÁNDEZ
Dr. CARLOS BALAGUER BERNALDO DE QUIRÓS

DEPARTAMENTO

Ingeniería de Sistemas y Automática

Leganés, Junio 2006

TESIS DOCTORAL

Metodología de diseño de robots asistenciales. Aplicación al robot portátil ASIBOT.

Autor: **ALBERTO JARDÓN HUETE**

Directores: **Dr. ANTONIO GIMÉNEZ FERNÁNDEZ**
Dr. CARLOS BALAGUER BERNALDO DE QUIRÓS

Firma del Tribunal Calificador:

Nombre y apellidos		Firma
Presidente:		
Vocal:		
Vocal:		
Vocal:		
Secretario:		

Calificación:

Leganés, de de 2006.

A Sonia y a mis padres

Agradecimientos

El trabajo que se presenta en este documento ha sido posible gracias a la inestimable ayuda de todas las personas que menciono a continuación. Quisiera agradecer, antes de nada, la ayuda recibida por parte de mi tutor Antonio Giménez, desde hace ya más de ocho años. Gracias a Antonio y a Carlos Balaguer, mi segundo tutor, fui capaz de realizar mi proyecto final de carrera en Ingeniería Industrial en el diseño un robot escalador, el ROMA II. Desde entonces, gracias al apoyo constante de ambos y su ilimitada capacidad de trabajo, he podido iniciar la carrera profesional que tanto me apasiona, el diseño de robots de servicios.

Gracias a mis compañeros del proyecto, penas y glorias incluidas, sin los cuales no hubieran sido posibles los logros alcanzados: Raúl Correal, Ramiro Cabás, Carlos Pérez y Santiago Martínez. El buen humor y calidad personal de todos nos permitirán recordar los malos momentos, las interminables jornadas de desarrollo del robot (abonados al telepizza para cenar...), con buen sabor de boca y la satisfacción del trabajo bien hecho y a tiempo.

No me olvido de los técnicos, José Antonio Campo y Angela Nombela, de la ayuda inestimable prestada aconsejando y resolviendo cuantos problemas estuvieran a su alcance con la profesionalidad que les caracteriza.

Quisiera agradecer al resto de compañeros del Dpto. y en especial a todos con los que compartido responsabilidades docentes, por su apoyo y comprensión y haber estado disponibles siempre para echar una mano.

Gracias a mis padres y hermanos por comprender la absorbente dedicación a este proyecto que por fin concluye, y saber disfrutar del poco tiempo que nos ha permitido compartir estos últimos años.

Gracias a Sonia, por estar siempre a mi lado, pese a mis incontables horas de dedicación a la tesis y ayudarme a soportar las rachas malas y aprovechar las buenas. Sin su apoyo incondicional y el de mi segunda familia, el desarrollo profesional y personal actual, no hubiera sido posible.

Y por último, gracias al Profesor A. Bicchi y al personal de su Centro, por permitirme dar los últimos retoques a este documento en sus instalaciones.

Pisa, a 7 de Junio de 2006.

Abstract

Nowadays, the growing number of elderly people in today's populations has created the need for developing some technical aids that helps disabled as well as elderly people. Although the field of rehabilitation robotics has been developing for over 25 years, still no useful efficient solutions have been achieved concerning to the benefit-cost ratio for the general society, and the solutions that do exist are limited to certain specific market segments.

This thesis proposes a methodology for the design of robotic assistant devices, from the creation of a multidisciplinary design team with the participation of the user, to the analysis of how the environment, tasks, users and safety issues, influence the decision making process using a scientific and also a humanistic point of view. The main goal of this methodology is to create robotic products which reach all the market segments, thereby reducing the costs of these.

The application of this methodology has led to the development of a portable assistance modular robot that can be easily integrated in to adapted environment and that responds to the special needs of a wide range of people.

Resumen

El envejecimiento extraordinario de la población provoca la necesidad de desarrollar ayudas técnicas que asistan tanto a personas discapacitadas como a ancianos. Si bien, el campo de la robótica asistencial lleva más de 25 años en desarrollo, todavía no se ha llegado a soluciones útiles y eficientes en cuanto al ratio beneficio-coste para el conjunto de la sociedad, y las actuales soluciones, se limitan a cubrir nichos de mercado.

Esta tesis propone una metodología para el diseño de robots asistenciales, que ha de partir de un equipo de diseño multidisciplinar e incluir a los usuarios en el proceso de diseño. Permite analizar, con enfoque global y no sólo científico, como influyen en la toma de decisiones los factores relacionados con el entorno, las tareas, el usuario y su seguridad. Plantea el diseño con el objetivo de desarrollar productos que lleguen a todos y por tanto sean potencialmente económicos.

La aplicación de esta metodología ha dado lugar al desarrollo de un sistema modular asistencial portátil, capaz de integrarse fácilmente en un entorno adaptado y de responder satisfactoriamente a las necesidades de un amplio espectro de personas con movilidad reducida.

Índice general

Índice general

Índice de tablas

Índice de figuras

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	3
1.3. Assistive Robots	8
1.4. Objectives of the thesis	9
1.5. Structure of the Report	10
2. Robots asistenciales	13
2.1. Consideraciones previas y antecedentes	15
2.2. Breve introducción histórica de los robots asistenciales	25
2.3. Clasificación de robots asistenciales	26
2.3.1. Robots asistenciales para suplir falta de movilidad	26
2.3.1.1. Sistemas fijos	27
2.3.1.2. Sistemas montados sobre sillas de ruedas	28
2.3.1.3. Sistemas móviles autónomos	30
2.3.1.4. Sillas de ruedas con guiado autónomo	31
2.3.2. Robots asistenciales para ayudar a andar y a la navegación	32
2.3.3. Robots asistenciales en el trabajo	34
2.3.4. Robots asistenciales de entretenimiento e interacción emocional	35
2.3.5. Robots asistenciales integrados en entornos domésticos adaptados	37
2.3.6. Prótesis robóticas	38
2.3.7. Robots asistenciales destinados a tareas fisioterapéuticas	39
2.3.8. Robots asistenciales humanoides	39
2.4. Interacción robot-usuario	40
2.4.1. Estrategias de seguridad en la interacción robot-usuario	47

2.4.1.1.	Evaluación del riesgo y seguridad para el usuario	47
2.4.1.2.	Mecanismos para reducir el riesgo	50
3.	Especificaciones de robots asistenciales	55
3.1.	Estudio teórico. Diseño de robots de servicios asistenciales	55
3.2.	Análisis de características funcionales	56
3.2.1.	Especificaciones generales de robots asistenciales	57
3.2.1.1.	Entorno	57
3.2.1.2.	Usuarios	58
3.2.1.3.	Tareas	59
3.2.1.4.	Seguridad	60
3.2.2.	Especificaciones básicas de un robot asistencial.	61
3.2.3.	Características funcionales enfrentadas	68
3.2.3.1.	Número de <i>GDL</i> frente al peso total	70
3.2.3.2.	Configuración cinemática frente a movilidad	73
3.2.3.3.	Tamaño frente velocidad de desplazamiento	74
3.2.3.4.	Integración de inteligencia a bordo	75
3.3.	Robots asistenciales desde el punto de vista del usuario	76
3.3.1.	Realidades y expectativas actuales y futuras	77
3.3.2.	El diseño orientado al usuario	78
3.3.3.	El usuario como generador de especificaciones de diseño	79
3.3.3.1.	Principios del Diseño Universal o Diseño para Todos	79
3.3.4.	El concepto de robot portátil y movilidad extendida	81
4.	Metodología de diseño mecatrónico de robots asistenciales	85
4.1.	El proceso de diseño	88
4.2.	Etapas del diseño	90
4.2.1.	Primera etapa: Definición del problema	91
4.2.2.	Segunda etapa: Desarrollo de la solución	97
4.2.2.1.	Definición de las características generales del robot	98
4.2.2.2.	Configuración preliminar	100
4.2.2.3.	Síntesis cinemática	101
4.2.2.4.	Estimación de pesos y cálculos preliminares	103
4.2.2.5.	Preselección de actuadores y materiales	105
4.2.2.6.	Diseño de la motorización	107
4.2.2.7.	Síntesis mecánica	120
4.2.2.8.	Optimización	123
4.2.2.9.	Validación del prototipo y Fabricación	124
4.2.3.	Tercera etapa: Evaluación de la solución	126

4.3.	Iteratividad del ciclo de diseño	127
4.3.1.	El diseño como un problema de optimización multivariable	128
4.3.2.	Optimización de “ratios estrella”	130
4.3.3.	Integración de herramientas de diseño	130
5.	Arquitecturas de control de robots asistenciales	135
5.1.	Introducción	135
5.2.	Modos de operación de RA	141
5.3.	Inteligencia ambiental y robots asistenciales	147
5.3.1.	Sistemas de asistencia modulares e integración en entornos AMI	151
5.4.	Interacción robot-entorno-usuario	155
5.5.	Arquitectura del sistema asistencial portátil	161
5.5.1.	Arquitectura de comunicaciones	165
5.5.2.	Sistemas de control a bordo	167
5.5.3.	Interfases de usuario	173
5.5.3.1.	Requisitos de los <i>HMI</i> utilizados en robots asistenciales	176
6.	Aplicación al robot asistencial portátil ASIBOT	179
6.1.	Desarrollo del sistema asistencial MATS	181
6.1.1.	Alcance del proyecto	181
6.1.2.	Descripción del proyecto	182
6.2.	Entorno de operación	182
6.2.1.	Análisis del entorno y de las tareas	184
6.2.2.	Extracción de especificaciones	187
6.3.	Descripción del sistema asistencial	191
6.3.1.	Elementos que componen el sistema asistencial	192
6.3.1.1.	Brazo manipulador-escalador	192
6.3.1.2.	Silla de ruedas con rail	193
6.3.1.3.	Sistema de agarre y conectores	194
6.3.1.4.	Entorno de evaluación	198
6.3.2.	Elementos de control del sistema	199
6.3.2.1.	Arquitectura de comunicaciones	200
6.3.2.2.	Interfases de usuario	203
6.3.2.3.	Arquitectura software del control embarcado	206
6.4.	Cinemática del robot ASIBOT	210
6.4.1.	Alternativas y solución adoptada	211
6.4.2.	Modelo cinemático del brazo	211
6.5.	Análisis dinámico del robot ASIBOT	215
6.5.1.	Consideraciones relativas al modelo dinámico	216

6.5.2.	Análisis de esfuerzos	219
6.5.3.	Diseño de los accionadores del robot	221
6.6.	Diseño mecánico del robot ASIBOT	225
6.6.1.	Verificación de la estructura mecánica	227
6.7.	Sistemas de control embarcados del robot ASIBOT	228
6.8.	Puesta en marcha e integración del robot con el resto del sistema	230
7.	Resultados experimentales y análisis crítico	235
7.1.	Resultados experimentales	235
7.1.1.	Ensayos en laboratorio	235
7.1.2.	Ensayos con pacientes reales	236
7.1.2.1.	Opinión de los usuarios	239
7.1.2.2.	Mejoras que reclaman	242
7.2.	Análisis crítico del robot ASIBOT	244
7.2.1.	Limitaciones del sistema	246
8.	Conclusions and future studies	249
8.1.	Conclusions	249
8.2.	Motivations	250
8.3.	Future studies	252
8.3.1.	Possible improvements to the portable robot aid	253
Apéndices		255
A.	Desarrollo de la cinemática del robot ASIBOT	257
A.1.	Descripción geométrica	257
A.2.	Cinemática directa	260
A.3.	Cinemática inversa	263
A.4.	Cinemática diferencial	269
B.	Descripción de los sistemas electrónicos a bordo del robot ASIBOT	274
B.1.	Unidad central de proceso, CPU	274
B.2.	Actuadores	275
B.3.	Sistemas de comunicaciones embarcados	281
C.	Publicaciones fruto de esta tesis	283
C.1.	Artículos en revistas	283
C.2.	Artículos en congresos	283
Bibliografía		285

Índice de tablas

2.1. Tabla de clasificación del tipo de interfaz adecuado según el tipo de discapacidad.	46
3.1. CD de robots industriales convencionales y del ASIBOT.	64
3.2. Cuadro de análisis de sensibilidad entre parámetros.	69
4.1. Influencia del peso de la motorización.	103
6.1. Entidades participantes en el proyecto MATS.	179
6.2. Resumen de especificaciones de los extremos.	194
6.3. Resumen de especificaciones de las pinzas alojadas en los extremos. . . .	197
6.4. Pesos aproximados de algunos objetos típicos de baño y cocina.	217
6.5. Resumen de pesos por capítulos.	228
7.1. Forma de desplazarse de los usuarios.	238
7.2. Experiencia en uso de PCs.	238
7.3. Resumen de las preguntas del cuestionario.	239
7.4. Tareas sugeridas por los usuarios.	240
7.5. Mejoras sugeridas por los usuarios.	240
7.6. Actividades posibles gracias al robot.	242
7.7. Comentarios recopilados por la cuestión 11.	242
7.8. Aspectos negativos.	243
1. Dimensiones del robot ASIBOT.	258
2. Rangos articulares.	259
3. Parámetros D-H para ambas bases.	261
4. Características de la CerfBoard®.	275
5. Características del motor <i>QT-1917</i>	276
6. Características del controlador MCDC2805.	280

Índice de figuras

1.1. Evolución la robótica.	2
1.2. Previsiones sobre el envejecimiento de la población española.	5
1.3. Distribución según grupo de discapacidad.	7
1.4. Distribución según la deficiencia causante.	7
2.1. Manipuladores de propósito general dedicados a tareas no industriales. . .	15
2.2. Clasificación de robots de servicios según el medio.	17
2.3. El robot canadiense MSS <i>Mobile Servicing System</i>	18
2.4. Clasificación de robots de servicios según el entorno y el nivel de interacción. .	19
2.5. Sistema de cirugía mínimamente invasiva para operaciones cardíacas. . .	21
2.6. Evolución de la robótica, de la industria al hogar.	24
2.7. Robots asistenciales fijos.	27
2.8. Robots asistenciales sobre silla de ruedas.	29
2.9. Robots móviles asistenciales.	30
2.10. Robots asistenciales basados en silla de ruedas.	31
2.11. Robots del proyecto <i>Nursebot</i> y el robot guía GUIDO.	32
2.12. Robots del proyecto <i>Morpha</i>	34
2.13. Robots asistentes en el trabajo.	35
2.14. Robots de interacción emocional.	36
2.15. El sistema robotizado de asistencia domótica LARES.	38
2.16. Interacción táctil e interfaz cerebral.	45
3.1. Prototipos de robots con múltiples <i>GDL</i>	71
3.2. Peso total del ROMA II frente al número <i>GDL</i>	72
3.3. Estudio de movilidad del robot ASIBOT en el entorno.	74
4.1. Conceptos básicos de ingeniería concurrente.	86
4.2. Arquitectura a nivel funcional.	87
4.3. Ciclo de diseño general de RA	89
4.4. Etapa I: Definición del problema.	94
4.5. Varias escenas simuladas de la cocina adaptada.	97

4.6.	Etapa II: Desarrollo de la solución.	99
4.7.	Diseño de detalle.	100
4.8.	Estudio de movilidad en el entorno.	102
4.9.	Histograma típico del par en un eje del prototipo.	104
4.10.	Ciclo de trabajo característico.	112
4.11.	Evolución de la potencia mecánica en el el ciclo de trabajo característico.	114
4.12.	Comparativa de ratios par-peso para el robot escalador ROMA II.	118
4.13.	Análisis de esfuerzos <i>WCA</i> en el robot ROMA II.	122
4.14.	Iteraciones desarrolladas en el robot ROMA2.	129
4.15.	Selección del motor mediante la curva característica.	131
5.1.	Aura: ejemplo de arquitectura para robos autónomos.	137
5.2.	Esquemas de control.	142
5.3.	Reparto de tareas de control entre el usuario y el robot.	145
5.4.	El sistema FRIEND evoluciona hacia el hogar inteligente.	154
5.5.	Arquitectura funcional genérica de un robot asistencial.	156
5.6.	Esquema de control copilotado para el MANUS.	157
5.7.	Esquema de telepropio-operación.	159
5.8.	Arquitectura completa del sistema asistencial.	162
5.9.	Arquitectura propuesta de control de RA.	163
5.10.	Interconexión elementos de inteligencia ambiental.	166
5.11.	Esquema de la arquitectura de procesos y comunicaciones implementada.	167
5.12.	Ejemplos de robots con arquitectura a bordo distribuida.	169
5.13.	Esquema de control del ARMAR.	170
5.14.	El robot DOMO a bordo distribuida.	171
5.15.	Ejemplos de dispositivos de interfase.	176
6.1.	Robot ASIBOT en viviendas adaptadas.	183
6.2.	Estudio de movilidad en silla de ruedas.	185
6.3.	Simulación de tareas.	186
6.4.	Dimensiones típicas de muebles de cocina.	186
6.5.	Resultados del estudio de tareas asistenciales.	187
6.6.	Estudio de localización de conectores I.	188
6.7.	Estudio de localización de conectores II.	189
6.8.	Especificaciones básicas del robot.	189
6.9.	Estudio de flexión del brazo.	190
6.10.	Errores en la instalación del anclaje.	191
6.11.	Arquitectura completa del sistema asistencial.	192
6.12.	Silla de ruedas con anclaje móvil por rail.	193
6.13.	Errores a corregir por el sistema de anclaje.	195

6.14. Extremo del robot en su anclaje y con portaherramientas.	197
6.15. Diseño de la garra en sus tres estados <i>Docking station</i>	198
6.16. Sistema de demostración del proyecto MATS.	199
6.17. Esquema de comunicaciones mínimo.	200
6.18. Canales de comunicación entre la <i>HMI</i> y el robot	201
6.19. Esquema de procesos ejecutándose en el robot.	201
6.20. Esquema de procesos ejecutándose en el <i>HMI</i>	203
6.21. Interfaz de usuario.	204
6.22. Pantallas de la interfaz de usuario.	205
6.23. Interfases de joystick.	206
6.24. Interacción entre los módulos software.	208
6.25. Configuraciones cinemáticas alternativas.	211
6.26. Configuración cinemática del robot ASIBOT.	212
6.27. Módulo de control cinemático a bordo.	214
6.28. Secuencia del proceso de anclaje de un punto a otro.	214
6.29. Modelos <i>WCA</i> simplificados del robot ASIBOT.	218
6.30. Análisis de posiciones más desfavorables, <i>WCA</i>	220
6.31. Descripción del peso de todos los elementos del robot ASIBOT.	221
6.32. Ubicación del <i>CDG</i> de los elementos del robot ASIBOT.	222
6.33. Aportación de cada elemento al par resistente total.	223
6.34. Validación del conjunto accionador.	223
6.35. Detalle de los ejes 1 y 5.	226
6.36. Detalle de los ejes 2, 3 y 4.	226
6.37. Modelo completo del robot en 3D	227
6.38. Características de los materiales empleados en el robot ASIBOT.	228
6.39. Arquitectura hardware a bordo.	229
6.40. El robot realizando transferencias.	230
6.41. Demostrador del sistema MATS implementado.	231
6.42. Imágenes del sistema asistencial desarrollado.	232
7.1. Imágenes de ensayos clínicos.	237
7.2. Clasificación de los usuarios según sus habilidades motoras	238
7.3. Clasificación según importancia de las funcionalidades implementadas.	241
1. Geometría del robot ASIBOT.	258
2. Posición cero elegida para el cálculo cinemático.	259
3. Sistemas de coordenadas de cada articulación.	260
4. Relación entre el punto extremo y la “muñeca” del robot.	265
5. Simplificaciones usadas para la cinemática inversa.	266
6. Esquema de las cuatro soluciones de la cinemática inversa.	268

7.	Generación de trayectorias cartesianas mediante la jacobiana inversa. . .	273
8.	Imagen de la CPU a bordo.	274
9.	“Torque motor” de los usados en el robot ASIBOT.	276
10.	Reductores Harmonic Drive® utilizados en el robot ASIBOT.	277
11.	Componentes utilizados en el robot ASIBOT.	279
12.	Controlador integrado usado en el ASIBOT.	280
13.	Disposición de la electrónica del tubo corto.	280